SNI 8398:2017

Standar Nasional Indonesia

Panduan studi kelayakan pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu

ICS 27.180

Badan Standardisasi Nasional

Daftar isi

Prakata

Standar Nasional Indonesia (SNI) 8398:2017 dengan judul "Panduan studi kelayakan pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)" dimaksudkan sebagai suatu panduan umum dalam melakukan studi kelayakan untuk pemanfaatan PLTB di suatu lokasi berdasarkan penilaian kelaikan dari aspek teknis dan nonteknis baik yang tersambung dengan *grid* maupun yang dipasang secara *off grid*.

SNI ini disusun oleh Komite Teknis 27-03, Aneka Energi Baru dan Energi Terbarukan melalui prosedur perumusan standar dan dibahas dalam rapat konsensus pada tanggal 18 Oktober 2016 di Bandung dengan melibatkan para narasumber, pakar, dan lembaga terkait, dan telah melalui tahap jajak pendapat tanggal 16 Januari 2017 sampai dengan 16 Maret 2017.

Perlu diperhatikan bahwa kemungkinan beberapa unsur dari dokumen standar ini dapat berupa hak paten. Badan Standardisasi Nasional tidak bertanggung jawab untuk pengidentifikasian salah satu atau seluruh hak paten yang ada.

Pendahuluan

Pembangkit Listrik Tenaga Bayu untuk selanjutnya disingkat PLTB adalah suatu pembangkit listrik yang sumber energinya aliran angin dengan cara memanfaatkan laju kecepatan angin dan luas sapuan. Pada umumnya PLTB skala kecil dengan pemanfaatan *off grid* listrik terbangkit merupakan arus bolak-balik yang bertegangan 220/380 volt AC, sebagai pengisi baterai. Sedangkan PLTB skala menengah dan besar dan umumnya disambungkan dengan grid (*on grid*) listrik terbangkit merupakan arus bolak-balik yang telah disinkronkan dengan tegangan dan frekuensi jala-jala listrik dimana sambungan dilakukan.

Standar ini memuat daftar istilah PLTB, tahapan pembangunan PLTB, proses studi kelayakan PLTB dan isi laporan sebuah hasil studi kelayakan. Untuk dapat memahami SNI ini diharapkan terlebih dahulu mempelajari buku pedoman, panduan, dan petunjuk teknis perencanaan/perancangan dan studi kelayakan PLTB. Diharapkan SNI ini dapat memberikan manfaat bagi kalangan profesional, praktisi, akademisi, pemerintah dan masyarakat pada umumnya

Panduan studi kelayakan pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)

1 Ruang lingkup

Standar ini merupakan panduan dalam melakukan studi kelayakan untuk mengetahui kelayakan suatu pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu/Angin (PLTB) baik dalam modus *off grid* (yang tidak terhubung dengan jaringan) maupun *on grid* (terhubung dengan jaringan) di suatu lokasi/wilayah berdasarkan penilaian dari aspek teknis (*supply*, potensi sumber daya energi, dan pemilihan teknologi PLTB), kajian data infrastruktur, serta aspek ekonomis, finansial dan sosial budaya di area kajian.

Beberapa aspek utama kriteria untuk PLTB *off grid* yang diperlukan adalah:

a. Ketersediaan data potensi angin dengan kecepatan rata–rata tahunan minimum 4 m/det pada ketinggian 50 m secara kontinu untuk periode 1 tahun.
b. Memenuhi hasil kajian infrastruktur, lingkungan, ekonomi, dan sosial, yang antara lain mencakup lokasi pembangkit tidak berada di kawasan cagar alam atau budaya yang melarang pembangunan fisik permanen sesuai regulasi/peraturan perundang-undangan yang berlaku.
c. Pemerintah Daerah bersedia untuk menyediakan lahan yang dibutuhkan.
d. Pemerintah Daerah bersedia untuk menerima dan mengelola PLTB
e. Kejelasan status penguasaan/kepemilikan dan peruntukan lahan.
f. Akses ke lokasi PLTB dapat digambarkan dengan skema yang jelas dan dapat dijangkau dengan metode tertentu sesuai dengan kebutuhan pembangunannya.
g. Pengelola yang ditunjuk oleh Pemerintah Daerah memiliki kemauan dan kemampuan untuk mengoperasikan dan memelihara PLTB.

Untuk *on grid*, diperlukan kriteria tambahan yaitu:
a. Ketersediaan data potensi angin dengan kecepatan rata–rata tahunan minimum 5 m/det pada ketinggian 50 m minimum untuk 1 tahun pengukuran dan data meteorologi jangka panjang lebih dari 10 tahun sebagai data pembanding.
b. Total jarak pembangkit terhadap titik interkoneksi (gardu penerima daya) untuk sistem masih memungkinkan.
c. Total kapasitas terpasang mampu menerima pasokan tambahan dari PLTB sesuai dengan ketentuan pihak pemilik jaringan utama.
d. Memenuhi persyaratan kajian studi grid.
e. Tersedia jaringan lokal yang memenuhi syarat sinkronisasi terhadap frekuensi dan tegangan.
f. Memenuhi hasil kajian infrastruktur (termasuk akses jalan menuju lokasi), lingkungan, ekonomi, dan sosial, yang antara lain mencakup lokasi pembangkit tidak berada di kawasan cagar alam atau budaya yang melarang pembangunan fisik permanen, sesuai regulasi/peraturan perundang-undangan yang berlaku dan tersedia lahan yang cukup untuk penempatan PLTB.

Dokumen ini dipersiapkan sebagai panduan untuk studi kelayakan pembangunan PLTB dalam modus operasi *off grid* (*stand alone, battery charger*) maupun *on grid*.

2 Acuan normatif

Standar ini mengacu pada:

SNI 1726:2012, *Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung.*

SNI 03-2847-2002, *Tata cara perencanaan struktur beton untuk bangunan gedung.*

SNI 03–1729–2002, *Tata cara perencanaan struktur baja untuk bangunan gedung*.

SNI IEC 61400-2:2016, *Turbin angin – Bagian 2: Persyaratan rancangan turbin angin skala kecil.*

SNI IEC 61400-12-1:2016, *Turbin angin – Bagian 12-1: Pengukuran kinerja daya listrik yang dihasilkan oleh turbin angin.*

IEC 61643-1, *Low-volltage surge protective device - Part 1: Surge protective device connection to low –voltage power distribution systems – requirement and tests.*

AWEA 3.1, *Design criteria for wind energy conversion system.*

3 Istilah dan definisi

Dalam standar ini, digunakan istilah dan definisi sebagai berikut:

3.1
turbin angin
suatu sistem yang mengubah energi angin menjadi energi listrik dan memiliki komponen-komponen utama rotor yang terdiri atas sudu dan *hub*/naf, *gear box* (jika menggunakan), *drive train* yang terdiri atas *shaft*, kopling, sistem pengereman, nasel (rumah turbin), sistem pengarah, generator, dan menara/*tower*

3.2
Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)
sebuah sistem pembangkit listrik yang terdiri dari turbin angin yang dilengkapi dengan sistem transmisi, distribusi, dan fasilitas pendukung lainnya

3.3
PLTB *off grid*
adalah pembangkit listrik tenaga bayu yang dipasang dan dioperasikan pada jaringan terbatas untuk keperluan di suatu komunitas dan tidak tersambung dengan *grid*

3.4
PLTB *on grid*
adalah pembangkit listrik tenaga bayu yang dipasang dan dioperasikan serta tersambung pada jaringan listrik/*grid* setempat (eksisting)

3.5
sistem jaringan *off grid*
sistem kelistrikan yang berdiri sendiri, tidak terhubung dengan jaringan listrik PLN

3.6
sistem jaringan *on grid*
sistem kelistrikan yang terhubung dengan jaringan listrik utama

3.7
kurva daya PLTB
adalah suatu kurva yang memberikan hubungan antara daya yang dihasilkan oleh turbin angin dan kecepatan angin setiap saat

3.8
faktor kapasitas *(CF-Capacity Factor)*
adalah perbandingan (rasio) antara daya/energi yang dihasilkan oleh PLTB pada kecepatan angin rata rata di lokasi dengan daya/energi nominal PLTB pada kecepatan nominalnya

3.9
kecepatan *cut-in,* V_{c-i}
kecepatan angin terendah pada ketinggian naf agar turbin angin menghasilkan daya listrik

3.10
kecepatan angin nominal/rencana, *rated wind speed, V_r*
kecepatan angin pada ketinggian naf yang diperlukan agar turbin angin menghasilkan daya nominal (*rated*)

3.11
kecepatan *cut-out*, V_{c-o}
kecepatan angin tertinggi pada ketinggian naf agar turbin angin tetap menghasilkan daya listrik

3.12
kondisi lingkungan
karakteristik lingkungan (ketinggian, kelembapan, temperatur, tekanan udara, dll) yang dapat mempengaruhi perilaku turbin angin

3.13
kondisi eksternal
faktor-faktor yang mempengaruhi operasi turbin angin termasuk kecepatan dan arah angin, gempa, kondisi jaringan listrik dan faktor iklim (hujan, panas, kelembapan dll)

3.14
distribusi Weibull
fungsi distribusi kemungkinan kecepatan angin yang bergantung pada dua parameter yaitu : parameter bentuk untuk mengontrol lebar distribusi dan parameter skala untuk mengontrol rata-rata kecepatan angin

3.15
luas sapuan rotor (*swept area*)
luas proyeksi rotor yang tegak lurus pada arah angin

3.16
geleng (*yawing)*
perputaran poros rotor terhadap poros vertikal (untuk turbin angin poros datar)

3.17
distribusi arah angin (*wind rose*)
adalah frekunsi datangnya arah angin pada setiap segmen (biasanya minimum 4 segmen, dan dapat 8 segmen, 12 segmen atau 24 segmen)

3.18
jaringan tegangan menengah (JTM)
jaringan listrik yang berfungsi mengalirkan listrik pada tegangan menengah 20 kV

3.19
jaringan tegangan rendah (JTR)
jaringan listrik yang berfungsi mengalirkan listrik pada tegangan rendah 380 V

4 Simbol/notasi, satuan dan singkatan

4.1 Simbol

Simbol/ Notasi	Parameter	Satuan
A	luas penampang	[m^2]
B	jumlah sudu	-
d	diameter rotor	[m]
f	frekuensi	[Hz]
k	parameter bentuk fungsi distribusi Weibull	[m]
n	kecepatan putaran rotor	[rpm]
P	daya listrik	[W]
t	waktu	[det]
v	kecepatan angin	[m/det]
V	tegangan listrik/voltase	[volt]
z_0	tinggi kekasaran permukaan	[m]
ŋ	efisiensi komponen antara keluaran listrik dan rotor (tipikalnya generator, roda gigi dan sistem konversi)	-
ρ	massa jenis udara	[kg/m^3]

4.2 Singkatan

AEP	*Annual Energy Production*
AkWh	*Annual kilo Watt hour*
EPF	*Energy Pattern Factor*
IRR	*Internal Rate of Return*
kWh	*Kilo Watt hour*
LKMD	Lembaga Ketahanan Masyarakat Desa
NPV	*Net Present Value*
PLTA	Pembangkit Listrik Tenaga Air
PLTB	Pembangkit Listrik Tenaga Bayu
PLTD	Pembangkit Listrik Tenaga Diesel
PLTU	Pembangkit Listrik Tenaga Uap

WPD *Wind Power Density*

5 Lokasi

5.1 Aksesibilitas

5.1.1 Jalan dan sarana tranportasi

Terkait dengan pengiriman atau transportasi komponen PLTB dan pemasangan di lokasi, mulai dari pabrikan turbin angin hingga ke lokasi perlu dilakukan pendataan. Data dan informasi yang diperlukan mencakup: kelas jalan (dalam tonase), lebar jalan, banyaknya belokan, tanjakan dan turunan mencakup kondisinya, jarak dari tempat pengiriman hingga ke lokasi, jembatan dan ukurannya, data pelabuhan, rel kereta api, jembatan layang (talang air), jalan tol dan akses gerbang, dll.
Sarana transportasi dan instalasi yang dibutuhkan menyangkut jenis dan kapasitas, yaitu kapal laut, kereta api, truk, alat angkut dan alat angkat berat (*crane*, *low bed truck*, *begho*, *trailer*) dll.

5.1.2 Kondisi kelistrikan di lokasi studi

Kondisi kelistrikan yang perlu dikaji di lokasi mencakup jenis pembangkit yang beroperasi di lokasi mencakup jenis pembangkit (misalnya PLTD, PLTU, PLTA dan lain-lain), kapasitas pembangkit, sistem jaringan, termasuk distribusi (jenis transmisi, gardu induk, tegangan, frekuensi, panjang jaringan), mode operasi, pola/profil beban harian, mingguan, bulanan dan tahunan. Letak dan kapasitas gardu induk, peta jaringan, dan distribusi.

5.1.3 Sistem komunikasi

Mencakup data dan informasi mengenai sistem komunikasi yang ada di lokasi, misalnya telpon, internet, jasa pengiriman barang, dll) dalam kaitan dengan pengiman data dari data *logger* ke pusat pengolahan data. Juga perangkat radio komunikasi di sekitar lokasi untuk diketahui jenisnya, apakah terpengaruh oleh frekuensi listrik/medan listrik dari PLTB.

5.2 Topografi

Data topografi mencakup kontur, orografi (misalnya lembah, gunung, bukit, dataran-dataran terjal), dan rintangan (misalnya bangunan, pepohonan, dll). Peta digital untuk simulasi, dapat digunakan peta DEM (*Digital Elevation Model*).

6 Aspek legal

6.1 Izin lokasi

Proses perizinan disesuaikan dengan Peraturan Daerah yang berlaku di daerah setempat. Oleh karena itu, dalam melakukan pengurusan perizinan harus mengetahui secara detail tata cara pengusulan perizinan di suatu daerah tersebut.

6.2 Status dan penggunaan lahan

Dalam rangka pengadaan lahan untuk pembangunan PLTB diperlukan survei lokasi untuk mengetahui harga tanah, status tanah dan peruntukannya. Pengadaan lahan untuk PLTB agar disesuaikan juga dengan Rencana Umum Tata Ruang (RUTR) suatu daerah.

6.3 Status kepemilikan lahan

Untuk mendapatkan akses ke pemilik lahan yang sesuai dengan pembangunan PLTB, pengembang perlu melakukan negosiasi dengan pemilik tanah, termasuk dalam kasus tanah negara. Bilamana terdapat dampak terhadap properti tetangga yang berdampingan dan lingkungan masyarakat sekitar, maka mereka harus dilibatkan dengan cara melakukan komunikasi sejak awal proses. Negosiasi diperlukan dengan pemilik tanah yang berdekatan atas isu-isu seperti akses lokasi untuk mengangkut mesin-mesin berat, aset sambungan listrik, dll.

7 Pasokan dan permintaan

7.1 Pasokan

Metode pengambilan data dan verifikasi

Daya angin spesifik yaitu daya per satuan luas yang tersedia di suatu lokasi dapat ditaksir sebagai berikut:

$$P = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (1)$$

Keterangan:

P adalah daya spesifik (W/m^2)

ρ · adalah massa jenis udara (kg/m^3)

V adalah kecepatan angin (m/det)

Daya spesifik dikenal sebagai rapat daya angin (WPD – *Wind Power Density*) dan merupakan dasar penaksiran potensi angin di lokasi.

Untuk kecepatan angin V (m/det) dan massa jenis udara ρ (kg/m^3), maka rapat daya angin (dalam W/m^2) adalah:

$$WPD = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (2)$$

Energi angin di lokasi yang dihasilkan dalam 1 tahun (AkWh) adalah

$$AkWh = (WPD) \times 8760 \times 10^{-3} \quad (3)$$

Keterangan:

8760 adalah jumlah jam dalam satu tahun

Distribusi kecepatan angin memberikan pola distribusi energi di lokasi yang dinyatakan oleh faktor pola energi (EPF - *Energy Pattern Factor*) yang dapat diperoleh berdasarkan kurva distribusi Weibull, dan dengan pola distribusi kecepatan angin yang diketahui berdasarkan pengukuran ini, maka energi aktual di suatu lokasi (dalam 1 tahun) dinyatakan sebagai AkWh (*Annual kilo Watt hour*) dalam kWh/m^2,

$$AkWh_{aktual} = EPF \times AkWh \quad (4)$$

Distribusi arah angin diberikan oleh kurva distribusi arah angin yang disebut *wind rose* yakni arah angin yang dinyatakan dalam sektor mata angin (Utara-Timur, Timur-Selatan, Selatan-Barat, Barat-Utara) dan dapat dibagi dalam beberapa sektor (umumnya 8, 12 atau 36 sektor) mulai dari Utara-Timur-Selatan, Barat sampai kembali ke Utara (360 derajat) dengan arah acuan nol adalah Utara.

Penaksiran potensi angin berdasarkan distribusi kecepatan angin digunakan Metode Bin.

Metode penentuan EPF, contoh kurva distribusi, dan *wind rose* diberikan pada Lampiran A.

7.2 Permintaan

7.2.1 Pemakaian listrik/*demand* (kWh/tahun)

Data beban merupakan data pemakaian energi oleh para pengguna berdasarkan besarnya energi yang digunakan misalnya dalam rumah tangga (lampu penerangan, mesin pendingin, peralatan listrik, dll), fasilitas umum (penerangan jalan, dll) ataupun pemakaian bersama (misalnya untuk penyediaan air, pengairan lahan perkebunan/pertanian, dll).

Pemakaian energi dinyatakan berdasarkan besarnya daya peralatan atau perlengkapan yang digunakan (dalam W) dan lamanya pemakaian listrik (jam) oleh pengguna setiap hari, setiap bulan atau selama 1 tahun dan dinyatakan dalam kWh; sehingga untuk sejumlah peralatan/perlengkapan listrik, energi total yang dibutuhkan merupakan penjumlahan dari masing masing pengguna yakni,

$$\text{Kebutuhan } (\textit{demand}) = \sum \text{kWh } (\text{I} = 1,2,3,\ldots,n) \quad (5)$$

7.2.2 Penaksiran kebutuhan energi yang akan datang

Penaksiran kebutuhan energi diharapkan dapat diperkirakan untuk minimal 5 tahun ke depan disesuaikan dengan pertumbuhan jumlah penduduk, perkembangan ekonomi, dan pemakaian energi, disesuaikan dengan Rencana Umum Kelistrikan Daerah (RUKD).

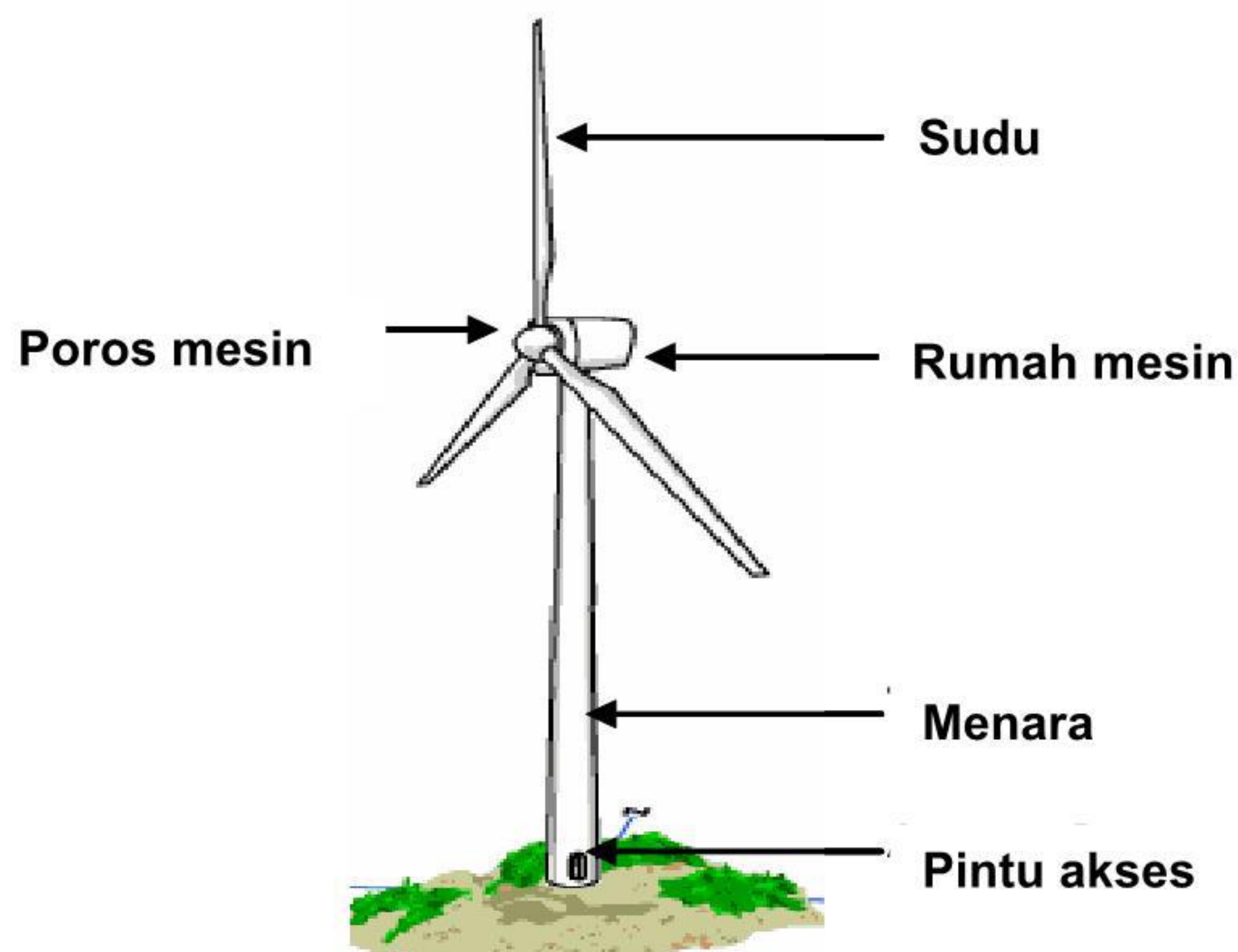
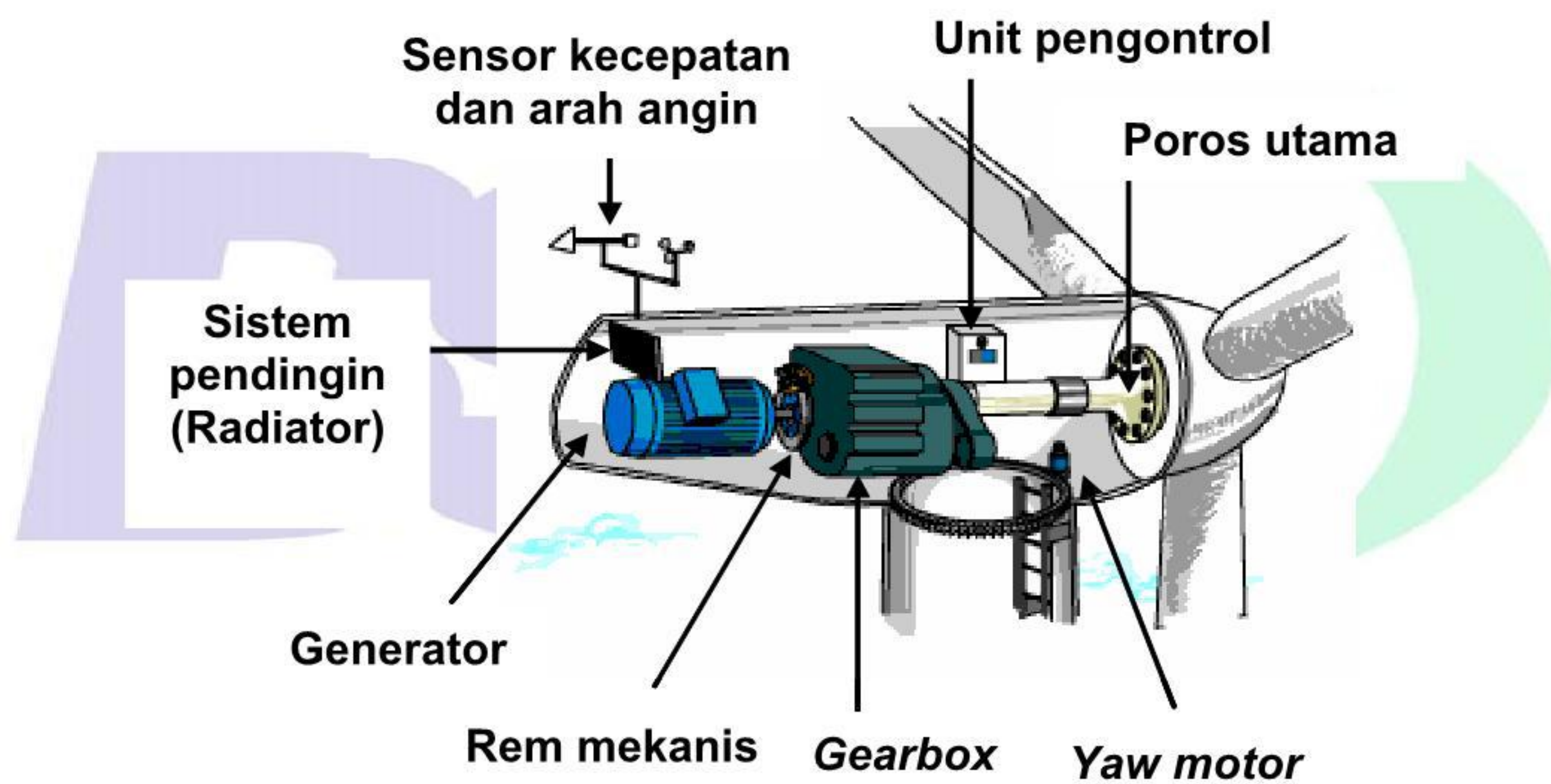
7.2.3 Pemakaian listrik/*demand*, sistem *on grid*

Dalam hal data kebutuhan pemakaian energi listrik (kWh/tahun) untuk sistem *on grid*, pengembang tidak perlu mendata setiap pengguna, akan tetapi diperlukan data pola beban dan kapasitas pembangkit terpasang di area yang akan dibangun pembangkit PLTB. Data lainnya adalah letak dan kapasitas gardu induk, jaringan transmisi dan distribusi, prediksi kelistrikan beberapa tahun ke depan.

8 Aspek teknis

8.1 Konfigurasi umum

Sebuah turbin angin berfungsi untuk mengubah energi kinetik angin menjadi energi listrik, dengan menangkap energi kinetik dan merubahnya dalam bentuk torsi melalui sudu atau rotor yang kemudian memutar generator (melalui *gearbox atau pulley*) sehingga menghasilkan energi listrik. PLTB dapat terdiri dari satu unit turbin angin atau beberapa unit yang dihubungkan secara paralel untuk memasok listrik baik dalam modus *off grid* maupun *on grid*.

Konfigurasi umum sebuah turbin angin yang diperlihatkan pada Gambar 1 dan 2 terdiri atas: rotor (naf dan sudu), nasel, unit transmisi daya mekanik, generator, menara dan sistem kontrol yang spesifikasinya bergantung pada tipe dan ukuran/kapasitas turbin angin. Konfigurasi umum sebuah turbin angin sebagai PLTB diperlihatkan pada Gambar 1.

Gambar 1 - Konfigurasi umum turbin angin

Gambar 2 - Anatomi turbin angin

Sumber : *GWEC*

8.1.1 Spesifikasi turbin angin

Berdasarkan konfigurasi, maka spesifikasi teknis sebuah turbin angin/PLTB adalah sebagai berikut:

Tabel 1 – Spesifikasi teknis turbin angin

	Komponen	Parameter/spesifikasi
	Tipe/Model	
	Kapasitas	W/kW/MW
	Pabrikan	Negara pembuat turbin angin
1	Rotor	▪ Posisi rotor (*up wind*/*down wind*) ▪ Diameter (m) ▪ Jumlah sudu: 2,3 atau lebih ▪ *Airfoil* (NACA) ▪ Material sudu (FRG) ▪ Putaran rotor, rpm ▪ Berat sudu (kg atau ton)
2	Menara	▪ Tipe: latis/tublar/gabungan ▪ Tinggi menara, m ▪ Material ▪ Berat menara, kg atau ton
3	Generator	▪ Kapasitas: W/kW/MW ▪ Tipe: dc/sinkron/asinkron ▪ Tegangan,V ▪ Fasa: 1 atau 3 ▪ Frekuensi: dc, 50 Hz atau 60 Hz ▪ Berat: kg atau ton
4	Nasel	▪ Tipe: tertutup/terbuka ▪ Berat: kg atau ton
5	Unit transmisi mekanik	▪ Tipe: roda gigi /sabuk ▪ Rasio ▪ Berat: kg atau ton
6	Sistem kontrol arah	Ekor pengarah/*yawing*/komputer
7	Kecepatan operasional, m/det	▪ Kecepatan start ▪ Kecepatan *cut-in* ▪ Kecepatan nominal(*rated*) ▪ Kecepatan *cut-out* ▪ Kecepatan maksimum
8	Produksi energi	dalam kWh/tahun atau MWh per tahun
9	Umur pakai	Tahun: skala besar khas 20-25 tahun

8.1.2 Komponen mekanikal turbin angin

8.1.2.1 Rotor

Rotor berfungsi untuk mengubah energi angin menjadi energi putaran rotor yang selanjutnya digunakan untuk memutar generator baik melalui unit transmisi maupun sambungan langsung. Besarnya daya atau energi per satuan waktu yang dihasilkan oleh rotor bergantung pada efisiensi rotor yang dinyatakan oleh koefisien daya rotor (C_p), dan ditentukan oleh berbagai parameter rotor berikut:

- diameter rotor, dalam m
- profil *airfoil* sudu (NACA, Clark Y, dll)
- jumlah sudu, umumnya 3 sudu karena pertimbangan stabilitas dan biaya dibandingkan dengan 2 atau 4 sudu
- material atau bahan sudu

- sistem pemasangan sudu (*fix* atau *variable pitch*)

Bahan sudu umumnya adalah *Glass Fibre Reinforced* (GFR) atau *epoxy*. Kualitas *epoxy* lebih baik dari GFR khususnya untuk ketahanan terhadap pengikisan.

Untuk turbin angin kecepatan tinggi pada dasarnya menggunakan *Glass Fibre Reinforced Polyester* (GFRP) atau sekarang ini *Carbon Fibre Reinforced Plastics* (CFRP) yang walaupun lebih mahal namun memiliki ketahanan lelah 3 kali lebih tinggi dibandingkan dengan GFR.
Sudu turbin angin terpasang pada naf, yang menghubungkan sudu dengan poros penggerak utama rotor. Bahan naf sudu biasanya terbuat dari besi atau aluminium *alloy*.

8.1.2.2 Nasel

Fungsi nasel adalah sebagai pelindung dari kondisi cuaca, dengan bahan yang umumnya terbuat dari *fiberglass* atau lempengan besi. Merupakan bagian dari turbin angin yang berfungsi untuk penempatan/*housing* beberapa komponen turbin angin antara lain unit transmisi, poros, generator, kopling mekanik, rem mekanik, agar terlindung dari pengaruh lingkungan yang membahayakan. Untuk turbin angin skala besar, juga untuk penempatan komponen lainnya, antara lain komputer dan panel, unit kontrol dan transformator. Pada umumnya bahan nasel terbuat dari bahan aluminium, besi cor, atau komposit.

8.1.2.3 *Drive train*

Drive train berfungsi untuk menyalurkan energi mekanis yang dihasilkan oleh rotor melalui poros ke generator untuk menghasilkan energi listrik. Secara umum *drivetrain* terdiri dari komponen yang berputar seperti: rotor, poros utama, kopling, *gearbox*, rem, dan generator.

8.1.2.4 Unit transmisi mekanik (*gearbox* atau sabuk)

Unit transmisi berfungsi untuk menyalurkan daya putar dari rotor ke generator dan mengubah kecepatan putaran dari lambat dan torsi yang besar menjadi putaran cepat dan torsi yang rendah (tipikal 10 - 20 rpm menjadi 1500-1800 rpm pada poros kecepatan tinggi).

Dalam perkembangan terakhir, pada umumnya turbin angin skala kecil tidak menggunakan *gearbox* lagi, karena biasanya menggunakan mekanisme *direct couple* dimana desain khusus generator mengikuti putaran dan torsi rotor. Untuk turbin angin skala besar, sebagian besar tipe masih mempertahankan adanya *gearbox*, akan tetapi sudah banyak yang menghubungkan langsung generator dengan rotor.

8.1.2.5 Poros utama

Salah satu komponen utama dalam *drivetrain* turbin angin adalah poros. Poros utama berfungsi untuk menyalurkan daya dari rotor ke generator dapat langsung atau melalui *gear* boks. Poros utama menyalurkan daya dengan torsi tinggi pada kecepatan putar yang rendah yang dihasilkan oleh rotor. Besarnya dimensi poros tergantung besarnya daya/torsi yang disalurkan dan kekuatan bahan. Bahan utama poros rotor adalah baja keras yang dibuat khusus untuk keperluan ini.

8.1.2.6 Rem dan kopling

Pada turbin angin skala kecil, umumnya tidak dilengkapi dengan rem dan kopling mekanik. Namun untuk keamanan dan perawatan, turbin angin kecil menggunakam rem elektrik, yaitu dengan menghubungsingkatkan kabel *output* generator secara berulang, sampai rotor berhenti berputar.

Pada turbin angin skala besar, rem sangat diperlukan karena pengeraman elektrik tidak lagi dapat digunakan. Rem mekanik ini dapat berupa rem *drum* atau *disk*, bergantung pada konstruksi yang diinginkan dan tempat pemasangan serta besarnya torsi yang dilakukan penrereman. Rem mekanik dapat dipasang pada torsi tinggi (poros utama) atau pada poros torsi rendah (putaran tinggi).

Kopling umumya digunakan pada turbin angin skala besar, yang berfungsi untuk menghubungkan dua poros, membuat kelurusan dan kelenturan (*aligment*). Tipe kopling dapat berupa rantai, roda gigi, atau plat. Bahan kopling, juga bergantung pada tipe yang digunakan, ada baja, ada karet, rantai, dan sebagainya.

8.1.2.7 Sistem geleng

Sistem geleng (y*aw system)* merupakan salah satu komponen penting turbin angin baik skala kecil maupun skala besar yang berfungsi sebagai pengarah turbin angin agar sesuai dengan arah angin aktual. Pada turbin angin skala kecil, sistem geleng dikendalikan oleh ekor. Sistem geleng pada turbin angin skala menengah-besar, untuk memutar turbin angin tersebut biasanya menggunakan 3-4 unit motor yang menggerakkan roda gigi yang dipasang pada nasel dan menara turbin angin. Besarnya motor penggerak tergantung dari besarnya dimensi dan berat nasel dan komponen yang tertumpu diatas menara. Sistem geleng dalam operasinya dapat aktif dan pasif yang digerakan oleh motor.

8.1.3 Komponen elektrikal turbin angin

8.1.3.1 Generator turbin angin

Merupakan unit pembangkit listrik yang menghasilkan tegangan listrik 1 atau 3 fasa dengan keluaran tegangan listrik searah (dc) atau bolak balik (ac) pada frekuensi yang ditetapkan dan dapat dikontrol oleh perlengkapan kontrol untuk menghasilkan kondisi operasi tertentu, misalnya tegangan dan frekuensi yang konstan atau berada dalam julat tertentu.

Sebagai komponen elektrikal PLTB, tipe generator yang umum digunakan adalah:

- Generator sinkron, dengan rotor yang terbuat dari magnet permanen (PM) atau rotor dengan elektromagnet yang dieksitasi oleh tegangan searah (*dc exited electromagnet)*
- Tipe generator sinkron dikelompokkan dalam (i) generator sinkron dengan kecepatan atau putaran tetap, (ii) dengan kecepatan variabel, (iii) *variable speed permanent magnet* (VSPM), (iv) *Direct Drive Synchronous Generator* (DDSG)
- Generator asinkron (generator induksi)
- *Variable speed generator*
  - Lebih efisien untuk menangkap energi angin dalam julat kecepatan angin yang lebih lebar.
  - Terdiri dari 3 jenis, yaitu: (i) *Double Fed Induction Generator* (DFIG), (ii) *Direct Drive Synchronous Generator* (DDSG) dengan eksitasi dc, (iii) *Direct Drive Permanent Magnet Generator* (DDPMG).

Untuk PLTB skala kecil modus *off grid*, generator yang umum digunakan adalah:

- generator magnet permanen yang menghasilkan tegangan ac yang dalam sistem kontrol disearahkan menjadi dc dan untuk menghasilkan listrik ac dapat menggunakan inverter; atau
- generator sinkron yang menghasilkan tegangan listrik ac 3 fasa dan dilengkapi dengan rangkaian penyearah untuk menghasilkan tegangan dc, umumnya 12 V_{dc} atau 24 V_{dc} dan biasanya digunakan untuk memasok daya ke pengguna yang dilengkapi dengan baterai penyimpan. Selanjutnya, tegangan ac dapat diperoleh dengan melengkapi

dengan inverter yakni untuk mengubah tegangan dc menjadi tegangan ac, 50 Hz sesuai dengan kebutuhan pelanggan.

Untuk turbin angin yang menggunakan generator sinkron ac dan dihubungkan ke *grid* (*on grid*) diperlukan sinkronisasi antara output PLTB (tegangan dan frekuensi) dan tegangan dan frekuensi jaringan.

8.1.3.2 Sistem penyimpan

Sistem penyimpan berupa baterai berfungsi untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan oleh turbin angin.

Spesifikasi baterai penyimpan yang dipilih adalah:

- Tegangan nominal: 2 V_{dc}, 6 V_{dc}, atau 12 V_{dc},
- Jenis: Lead-Acid atau Nickel–Cadmium, Lithium Ion, dll
- Tipe: *deep discharge* atau biasa
- Kapasitas baterai dalam Ah *Ampere-hour*, dipasang seri dan paralel
- Efisiensi baterai
- Umur pakai
- Dimensi dan berat

8.1.3.3 Inverter

Inverter berfungsi untuk mengubah tegangan listrik searah (dc) menjadi tegangan listrik bolak-balik (ac). Dengan tegangan input inverter mengikuti kelipatan tegangan baterai, pada umumya tegangan 12 V_{dc}, 24 V_{dc}, 36 V_{dc}, 110 V_{dc} dan 240 V_{dc}, dan tegangan output, mengikuti beban pengguna yang umumnya tegangan 240 V_{ac}, 50 Hz.

Pemilihan sebuah inverter didasarkan pada:

- Tipe *bidirectional* atau *single directional*
- Tegangan masukan, V
- Tegangan keluaran (V) dan jenis (sinkron atau asinkron)
- Dimensi dan berat

Inverter *bidirectional* adalah inverter yang berfungsi sebagai konverter tegangan dc ke tegangan ac dan dapat berfungsi sebagai *charger* dari tegangan ac ke tegangan dc.

8.1.4 Subsistem monitor

Subsistem monitor berfungsi untuk memonitor kondisi operasi PLTB setiap saat yaitu besarnya tegangan (dalam V), arus pemakaian (dalam A), frekuensi (dalam Hz) dan energi yang dihasilkan (dalam kWh), kecepatan angin sesaat (dalam m/det). Kondisi tersebut dapat dilihat pada panel monitor yang dilengkapi dengan indikator tegangan, arus, frekuensi, dan energi; dan bergantung pada tipe turbin angin.

8.1.5 Subsistem kontrol

Komponen sistem kontrol dapat berupa komponen mekanik, elektrik, hidraulik atau kombinasi. Fungsi sistem kontrol pada sistem *off grid* yang digunakan untuk mengisi baterai adalah mencegah pengisian-lebih pada baterai, dan sistem ini umumnya adalah dari jenis elektronik.

Subsistem kontrol berfungsi untuk mengontrol daya listrik ke pemakai/pengguna/konsumen dengan kondisi operasi tertentu yakni tegangan, arus, dan frekuensi serta pasokan energi

yang telah ditetapkan. Subsistem kontrol yang dilengkapi pada panel kontrol pada umumnya adalah kontrol elektronik untuk pengaturan tegangan dan frekuensi, dan penggunaan *dummy load* berupa beban resistif untuk pengontrolan pasokan lebih ke pemakai.

Untuk sistem kontrol PLTB yang terhubung dengan jaringan (*on grid*) fungsinya lebih komplek, dan harus dapat melakukan sinkronisasi tegangan dan frekuensi untuk dapat dikoneksikan dengan jaringan yang tanpa menimbulkan gangguan dan dapat beroperasi secara optimal, serta menjaga kestabilan operasional dan keamanan sistem.

Pada pemanfaatan yang lebih besar (*wind farm*), subsistem kontrol dan monitor dilengkapi dengan sistem SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) untuk memonitor dan mengontrol operasional *wind farm*.

8.1.6 Sistem keselamatan dan proteksi

Dalam PLTB, sistem proteksi dapat merupakan pemasangan penangkal petir yang berfungsi untuk melindungi PLTB dari kemungkinan disambar petir atau sistem pentanahan yang memenuhi standar. Proteksi lain adalah terhadap kecepatan lebih atau tegangan lebih.

Penangkal petir untuk instalasi PLTB mencakup: pentanahan yang sesuai, sambungan listrik yang baik serta alat proteksi surya pada generator, kawat pengontrol dan sistem daya.

Pada PLTB skala besar dan *on grid*, untuk penyambungan PLTB ke jaringan diperlukan suatu aturan untuk menjaga stabilitas dan keamanan sistem yang biasanya diatur dalam kode integrasi, *grid code*. Masing-masing negara memiliki *grid code* yang spesifik.

Sistem proteksi yang digunakan mengacu pada standar SNI 03-7015-2004: *Sistem proteksi petir pada bangunan gedung*.

8.1.7 Rumah pembangkit

Rumah pembangkit adalah bangunan yang berfungsi untuk melindungi peralatan kontrol baik elektrikal maupun mekanikal dari kemungkinan adanya gangguan. Gangguan tersebut dapat berupa cuaca, banjir, dan pihak-pihak yang tidak berkepentingan. Rumah pembangkit harus ditempatkan pada tanah yang stabil, datar, dan dekat dengan akses jalan. Konstruksi rumah pembangkit harus kuat dan tidak boleh roboh. Rumah pembangkit dapat diperluas fungsinya untuk kantor dan pelayanan yang berkaitan dengan pendistribusian aliran listrik ke masyarakat yang membutuhkannya. Rumah pembangkit juga harus aman dari pencurian peralatan yang ada di dalamnya.

Pada sistem *off grid*, rumah pembangkit dapat digunakan untuk menyimpan baterai, inverter dan juga diesel generator cadangan.

8.1.8 Menara

8.1.8.1 Tipe menara PLTB

Tipe menara PLTB mencakup: berbentuk pipa (tubular), rangka baja (*lattice*) dapat *self support* atau dengan *guy wires* (tali pancang), dan menara tipe *mono-structure* (beton atau baja tubular). Pemilihan tipe menara mempertimbangkan kapasitas turbin angin, lokasi pemasangan, akses menuju lokasi, estetika, dan biaya.

8.1.8.1.1 Menara bentuk pipa (*tubular*)

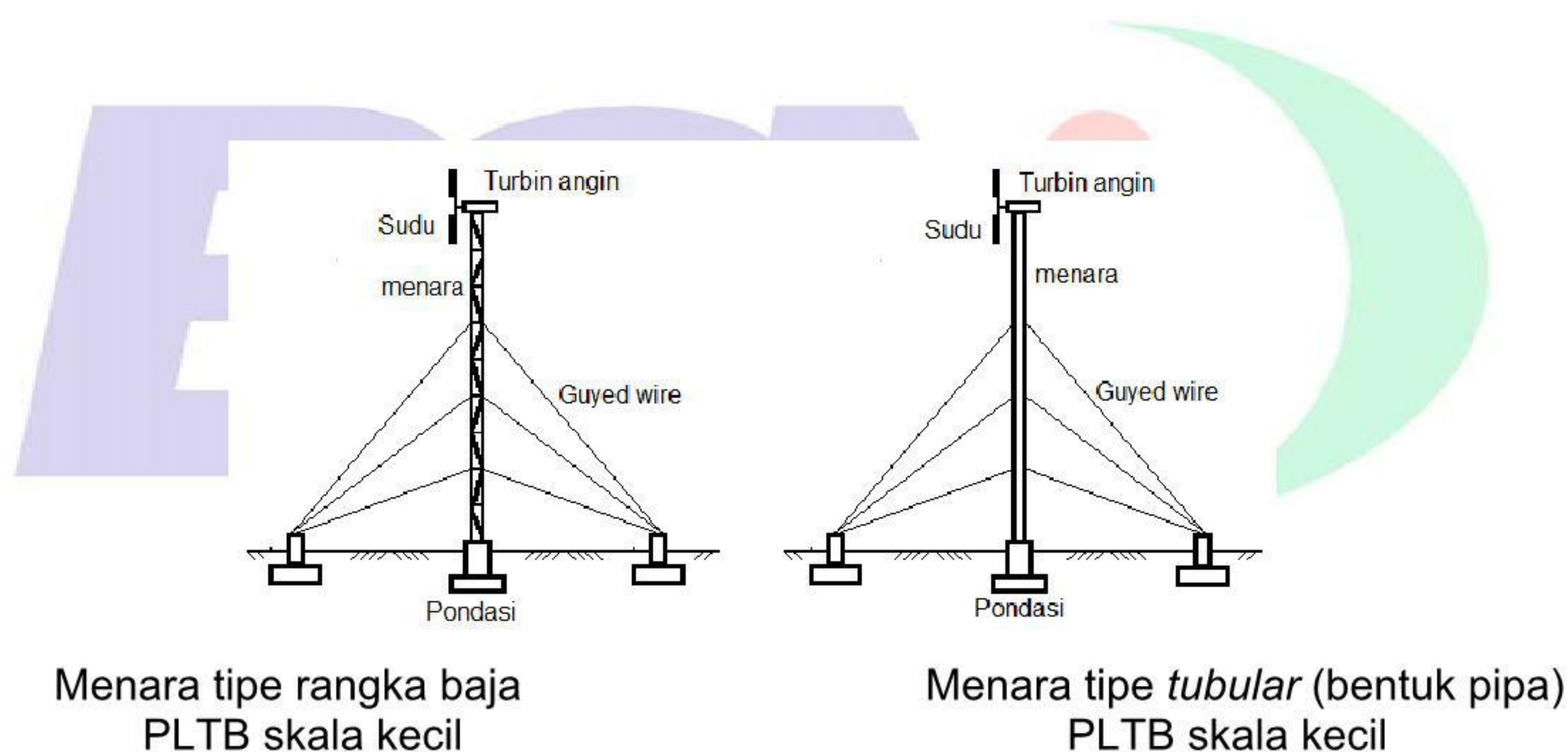
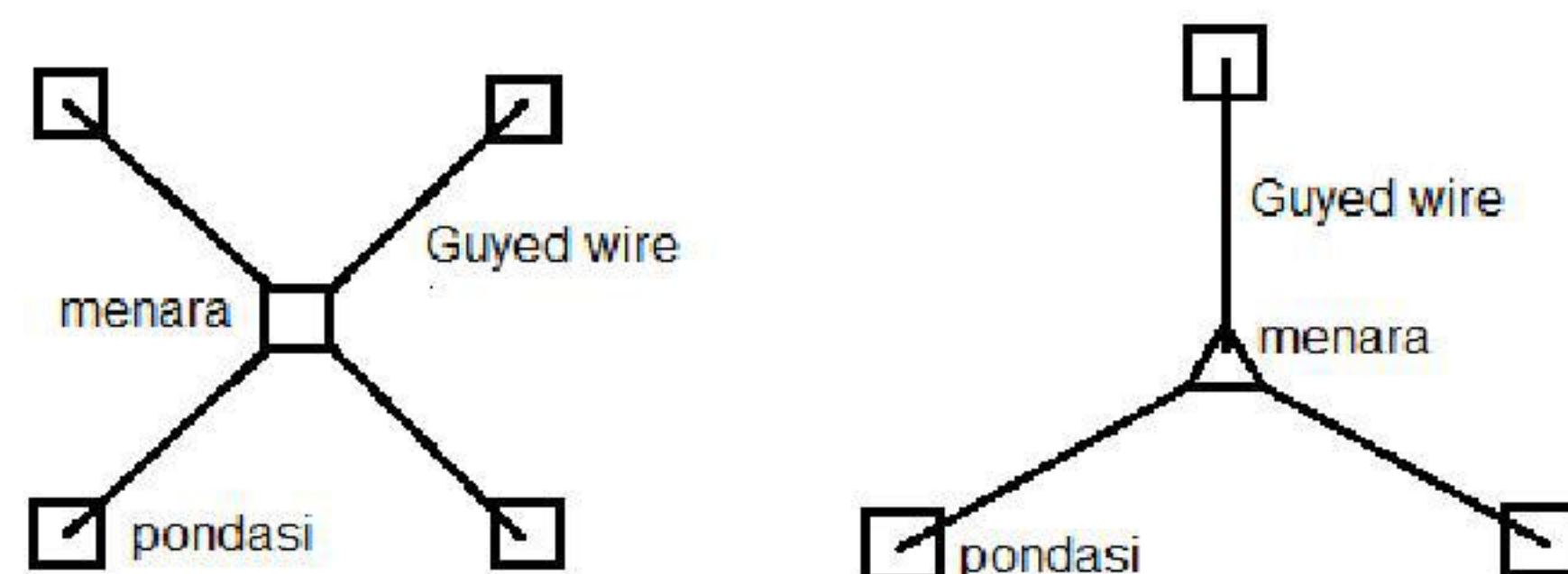
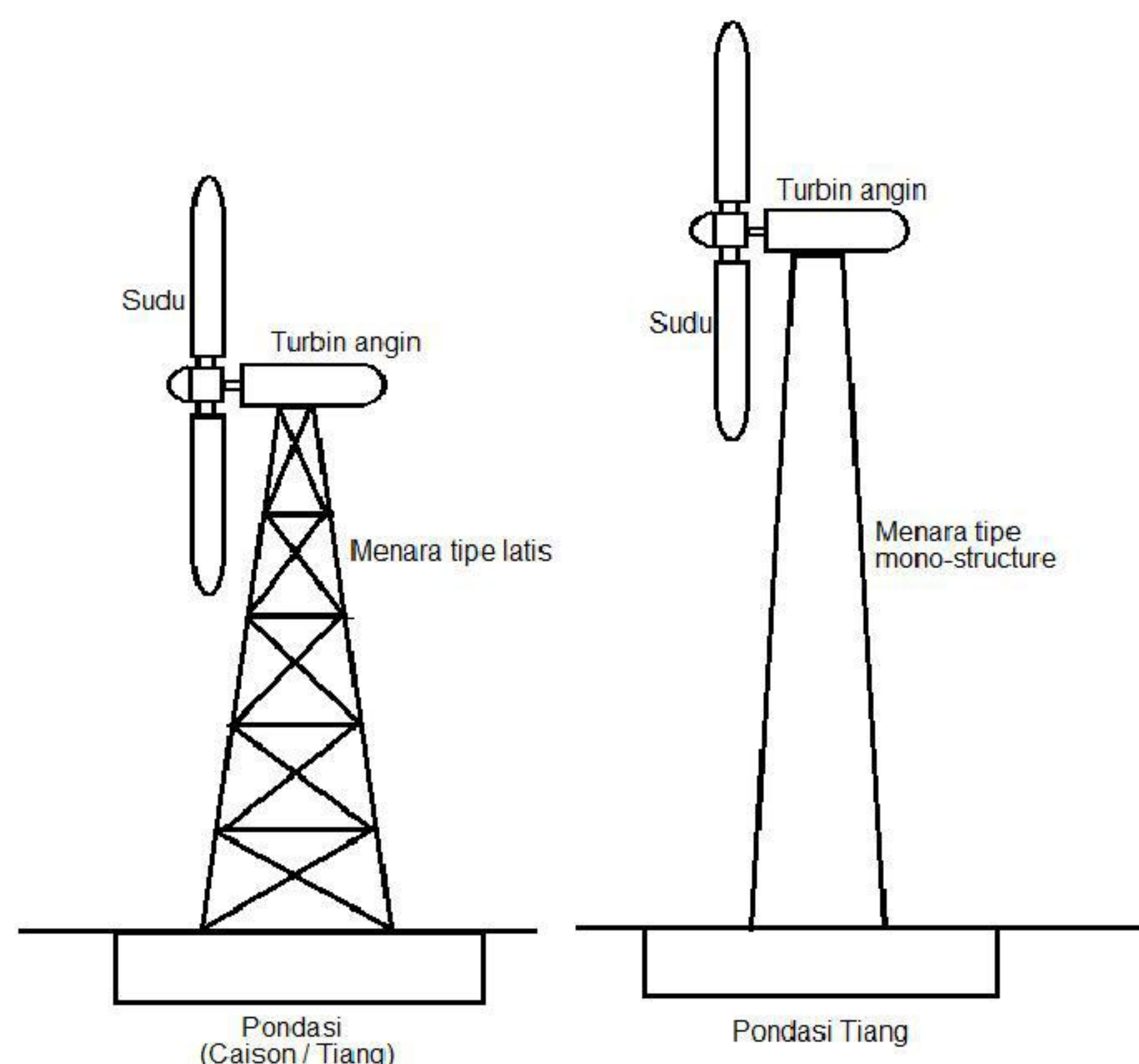
Menara tipe ini dapat dibuat dari pipa baja atau bahan logam lainnya yang memerlukan pengikatan dengan tali pancang atau tidak diperlukan (*self support*). Menara tipe ini biasanya dilengkapi dengan sarana untuk memanjat. Menara tipe ini yang menggunakan penguat pancang umumnya digunakan untuk PLTB kapasitas kecil, sedangkan untuk skala besar tipe tubular tanpa tali pancang.

8.1.8.1.2 Menara tipe rangka (*lattice*)

Menara tipe rangka dibuat dari penyambungan-penyambungan profil siku/pipa baja dengan sambungan mur dan baut. Konstruksi menara ini seperti halnya pada menara tipe tubular dimana dapat dengan tali penguat ataupun tanpa pancang penguat (*self support*).

8.1.8.1.3 Menara tipe *mono structure*

Menara tipe ini digunakan untuk PLTB kapasitas lebih dari 100 kW. Kebanyakan tipe ini menggunakan pipa baja dengan dimensi yang besar. Disamping terbuat dari baja, tipe *mono structure* ini dapat dibuat dari beton pra cetak.

Menara tipe rangka baja PLTB skala kecil — Menara tipe *tubular* (bentuk pipa) PLTB skala kecil

Gambar 3-1 – Menara PLTB skala kecil

Gambar 3-2 - Tali pancang (*guyed wire*) kaki 4 dan kaki 3

Menara tipe latis PLTB skala menengah

Menara tipe *mono-structure* PLTB skala besar

Gambar 3-3 - Menara PLTB skala menengah dan besar

8.1.8.2 Struktur menara

Konstruksi menara PLTB dapat dibuat dari baja profil atau beton bertulang. Penggunaan baja profil akan memudahkan pemasangan di lapangan, karena profil baja sudah dapat disiapkan di pabrikan. Jika menggunakan beton bertulang, maka dibutuhkan suatu pekerjaan pembuatan beton di lokasi. Alat-alat berat yang perlu disiapkan di lapangan antara lain *concrete mixer* (alat pencampur adukan beton), *crane* (alat pengangkat material), *truck*, dan alat pengecor beton.

8.1.9 Pondasi

8.1.9.1 Penyelidikan tanah

Tujuan penyelidikan tanah adalah untuk:

- menentukan sifat-sifat tanah yang terkait dengan perancangan struktur yang akan dibangun di atasnya,
- menentukan kapasitas dukung tanah menurut tipe pondasi yang dipilih,
- menentukan tipe dan kedalaman pondasi,
- mengetahui posisi muka air tanah,
- memprediksi besarnya penurunan tanah.

8.1.9.2 Jenis pondasi

8.1.9.2.1 Pondasi dangkal

Pondasi dangkal adalah pondasi yang ditempatkan pada kedalaman antara 1,0 – 2,0 m dari permukaan tanah. Untuk penggunaan pondasi dangkal pada PLTB lebih tepat menggunakan pondasi telapak. Pondasi telapak dipergunakan pada kondisi tanah dengan daya dukung tanah antara: 1,50 - 2,00 kg/cm^2. Pondasi telapak ini biasanya dipakai untuk mendukung

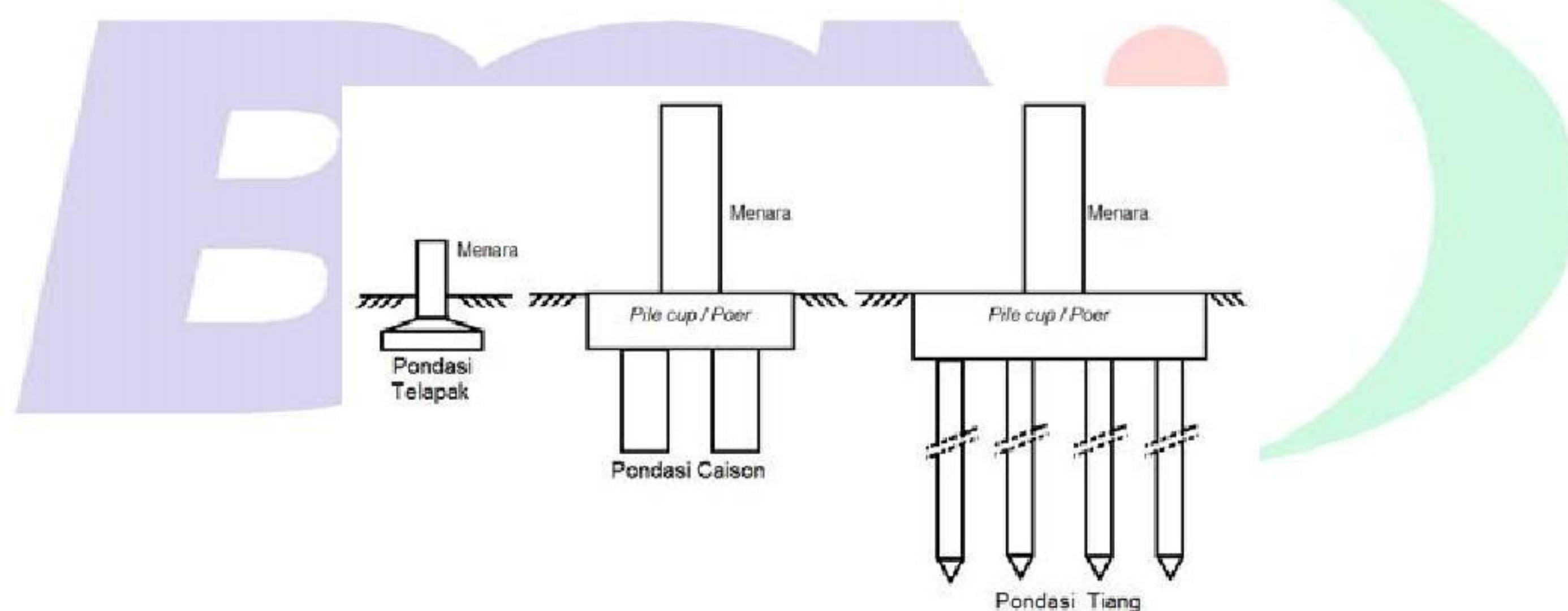
konstruksi cukup berat, dengan kondisi tanah yang baik dan stabil. Untuk perencanaan dimensi pondasi menggunakan perhitungan konstruksi beton bertulang.

8.1.9.2.2 Pondasi sumuran (*Caison*)

Pondasi sumuran adalah pondasi yang meneruskan beban bangunan ke tanah keras atau batuan yang relatif jauh dari permukaan tanah. Pondasi ini diletakkan pada tanah keras pada kedalaman antara 3,0 – 5,0 m dari permukaan tanah. Pada umumnya pondasi sumuran ini digunakan pipa beton yang dimasukkan ke dalam tanah kuat yang kemudian diisi dengan adukan beton. Untuk peletakan konstruksi di atasnya, maka dibuat Poer yang dibuat dari beton bertulang yang menyatu dengan pondasi sumuran.

8.1.9.2.3 Pondasi tiang

Pondasi tiang pancang digunakan untuk jenis-jenis tanah yang memiliki daya dukung tanah yang kecil atau letak tanah kerasnya lebih dari 5 m. Sehingga pondasi tiang pancang sangat tepat untuk digunakan pada kondisi tanah tersebut. Pondasi tiang pancang dibuat menjadi satu kesatuan yang monolit dengan menyatukan pangkal tiang pancang yang terdapat di bawah konstruksi dengan tumpuan pondasi. Tiang pancang pada umumnya dibuat dari beton bertulang.

Ketiga jenis pondasi diperlihatkan pada Gambar 3.

Gambar 4 – Jenis-jenis pondasi

8.2 Pemilihan teknologi

8.2.1 Kelas kecepatan angin

Setelah mengidentifikasi potensi energi angin dan lokasi, maka tahap selanjunya adalah memilih teknologi PLTB dari manufaktur yang dapat dipercaya. Pemilihan teknologi PLTB sangat bergantung pada sumber daya energi angin, tujuan dari proyek, harga dan ketersediaan turbin angin, serta kehandalan sistem dan ketersediaan suku cadang serta keahlian untuk memperbaiki turbin angin jika rusak dan juga kondisi infrastruktur dan lingkungan lokasi.

Berdasarkan standar IEC 61400-1, kecepatan angin dibagi dalam 4 kelas. Klasifikasi kecepatan angin ini, didasarkan pada potensi energi angin setempat di lokasi turbin angin dipasang. Sebagai acuan, klasifikasi kecepatan angin sebagai berikut:

Tabel 2 - IEC 61400-1 *Wind Classification*

Parameter	Kelas I	Kelas II	Kelas III	Kelas IV
Annual average wind speed, U_{ave} (m/s)	10	8.5	7.5	6
50 *year gust speed*, 1.4 U_{ref} (m/s)	70	59.5	52.5	42
Turbulence Classes (%)	A 18%	A 18%	A 18%	A 18%
	B 16%	B 16%	B 16%	B 16%

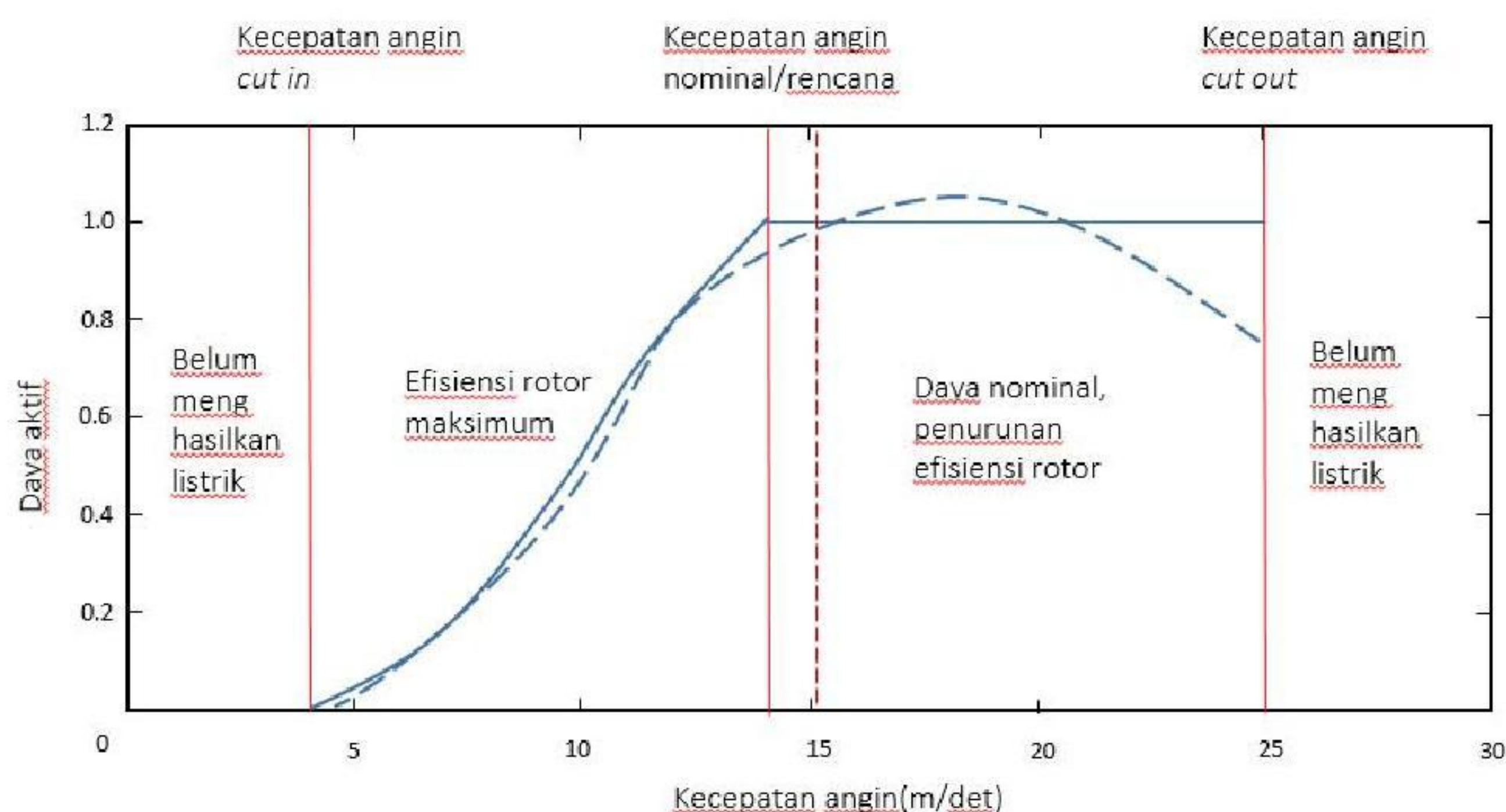
8.2.2 Kapasitas turbin angin

Kapasitas atau daya maksimum yang dibangkitkan oleh turbin angin dihitung dengan persamaan:

$$P_{wtg} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2} \times c_p \times \rho \times A \times f_i \times v_i^3 \qquad (6)$$

Keterangan:

Cp adalah koefisien daya rotor
ρ adalah rapat massa udara (kg/m^3)
A adalah luas sapuan rotor (m^2)
f_i adalah distribusi frekuensi pada kelas i (%)
v_i adalah kecepatan angin (m/det)

Dalam praktik kapasitas turbin angin ditunjukkan melalui karakteristik daya tipikal, dimana daya rancangan adalah menunjukkan kapasitas. Karakteristik daya turbin angin merupakan kurva hubungan antara kecepatan angin dan daya output, yang tipikal seperti diperlihatkan pada Gambar 4.

Gambar 5 - Perbandingan Kurva Daya Turbin Angin Kecepatan Variabel dan Kecepatan Tetap

Garis kurva yang diperlihatkan pada Gambar 4. adalah kurva daya dari turbin angin kecepatan variabel dan garis kurva putus-putus adalah kurva daya jenis turbin angin kecepatan tetap.

Daya output pada kecepatan angin berbeda akan berbeda untuk setiap tipe turbin angin, sehingga untuk memilih tipe turbin angin yang paling sesuai dengan kondisi angin di suatu

lokasi harus memperhatikan kurva daya yang dimulai dari kecepatan angin $V_{cut\text{-}in}$, V_{rated} dan $V_{cut\text{-}out}$.

Kapasitas turbin angin dinyatakan dalam W, kW ataupun MW. Pelat nama ”*name plate*” menunjukkan kapasitas turbin angin.

8.2.3 Energi yang dihasilkan oleh turbin angin dalam satu tahun

Energi *output* turbin angin E_{wtg} yang disebut juga AEP (*Annual Energy Production*) :

$$E_{wtg} = P_{wtg} \times \Delta t \qquad (7)$$

Keterangan:

E_{wtg} adalah energi *output* turbin angin dalam satu tahun (Wh)
P_{wtg} adalah daya *output* turbin angin (W)
Δ_t adalah periode data (1 tahun=8760 jam)

8.2.4 Faktor kapasitas turbin angin

Yang dimaksud dengan faktor kapasitas dalam pemanfaatan teknologi turbin angin adalah perbandingan *output* energi turbin angin di suatu tempat sesuai potensi yang ada dibandingkan dengan *output* energi turbin angin daya nominal, yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$C_f = \frac{E_{wtg}}{E_{wtg(nom)}} \qquad (8)$$

Keterangan:

C_f adalah faktor kapasitas
E_{wtg} adalah *output* energi turbin angin dalam satu tahun (kWh)
$E_{wtg(nom)}$ adalah *output* nominal energi turbin angin (kWh)

9 Aspek sosial

Kajian aspek sosial dimaksudkan untuk mempelajari pengaruh/dampak lingkungan yang terjadi dalam kehidupan sosial setempat. Perkembangan dalam kehidupan sosial akan berdampak baik apabila masyarakatnya dilibatkan sejak awal tahap penyusunan program. Keberadaan lembaga formal pemerintahan desa, lembaga nonformal seperti organisasi kemasyarakatan/agama, koperasi, puskesmas, LKMD, dan unit kelompok kegiatan di masyarakat seperti posyandu, aktivis/tokoh masyarakat apabila terjalin dan terkoordinasi yang baik, maka akan terjadi sinergi pengelolaan yang saling merasa memiliki tentang operasional dan pengembangan PLTB.

9.1 Kependudukan

Aspek kependudukan berupa kondisi penduduk setempat yang akan merasakan langsung dampak adanya PLTB. Data kependudukan tersebut diantaranya adalah:

a. Jumlah dan komposisi penduduk di sekitar lokasi
b. Mata pencaharian dan penghasilan penduduk
c. Tingkat pendidikan, secara khusus diidentifikasi yang memiliki pendidikan teknis/kejuruan terkait PLTB
d. Struktur/tatanan kelembagaan dalam masyarakat
e. Ketersediaan material lokal, sumber energi, dan pola pemanfaatannya
f. Informasi usaha produktif dan sumber daya ekonomi lokal
g. Respon dan dukungan pemerintah daerah setempat terhadap rencana pembangunan PLTB

9.2 Survei keberterimaan masyarakat

Pada dasarnya keberterimaan masyarakat terhadap pembangunan PLTB di suatu lokasi terpilih dapat ditunjukkan dengan adanya peningkatan taraf hidup yang dirasakan masyarakat sebelum dan sesudah adanya pembangunan PLTB, oleh karena itu masyarakat perlu dilibatkan. Dengan demikian, masyarakat akan lebih mudah menilai keberhasilan atau dampak pelaksanaan pembangunan PLTB.

9.3 Partisipasi lokal

Partisipasi lokal yang diharapkan diantaranya adalah melibatkan lembaga swadaya, koperasi, unit usaha lokal yang sudah ada di lokasi sekitar pembangunan PLTB. Contohnya adalah penyediaan material dan listrik, tenaga kerja setempat, dan lain-lain.

10 Aspek ekonomi/finansial

Perhitungan kelayakan ekonomi dan finansial untuk PLTB *off grid* dan PLTB *on grid* perlu dilakukan. Kajian finansial lebih diutamakan untuk turbin angin skala besar *(on grid)* karena menyangkut perhitungan harga listrik yang dihasilkan per kWh.

10.1 Penyusunan Rancangan Anggaran Biaya (RAB)

Untuk pembangunan PLTB *off grid*, RAB dapat disusun sebagai berikut:

a. Pengadaan komponen PLTB (rotor, generator, roda gigi, nasel, sistem kontrol, sistem proteksi, dll)
b. Penyiapan perlengkapan bantu (alat-alat berat)
c. Pengiriman ke lokasi
d. Pekerjaan sipil (pondasi, rumah pembangkit, menara)
e. Pemasangan turbin angin di lokasi
f. Instalasi jaringan dan distribusi listrik

Untuk pembangunan PLTB *on grid*, dilakukan kajian ekonomi dan finansial.

10.2 Analisis keekonomian

Analisis ekonomi adalah analisis usaha yang melihat dari sudut perekonomian secara keseluruhan. Dalam analisis ekonomi yang diperhatikan adalah hasil total atau produktivitas atau keuntungan yang didapat dari semua sumber yang dipakai dalam proyek untuk perekonomian. Dalam analisis keekonomian yang diperlukan adalah:

a. Harga jual listrik (Rupiah per kWh)
b. Payback period
c. Perhitungan *Cost Benefit Ratio* (CBR)

10.3 Kajian finansial

Analisis finansial adalah analisis kelayakan yang melihat dari sudut pandang pemilik. Analisis finansial diperhatikan di dalamnya adalah dari segi *cash-flow* yaitu perbandingan antara hasil penerimaan atau penjualan kotor (*gross-sales*) dengan jumlah biaya-biaya (*total cost*) yang dinyatakan dalam nilai sekarang untuk mengetahui kriteria kelayakan atau keuntungan suatu proyek. Kajian finansial diperlukan untuk mengetahui apakah proyek pembangunan PLTB komersial, yang meliputi:

a. NPV (*Net Present Value*)
b. IRR (*Internal Rate of Return*)

11 Aspek lingkungan

Identifikasi dampak lingkungan disesuaikan dan mengacu pada peraturan terkait AMDAL/UKL-UPL.

12 Risiko

Dalam pembangunan PLTB terdapat beberapa risiko yang perlu diperhatikan.

12.1 Risiko legal

Secara legal, risiko yang mungkin dihadapi adalah keterlambatan pembangunan PLTB, perjanjian jual beli energi listrik, perizinan, dan lain-lain.

12.2 Risiko teknis

Meliputi antara lain risiko-risiko yang timbul pada saat proses pembangunan PLTB, misalnya kemampuan PLTB tidak sesuai dengan target yang ditetapkan, pra-operasional & operasional (misalnya keluaran energi sistem tidak terserap oleh beban karena keterbatasan/gangguan jaringan), persetujuan proyek berlarut-larut, proses tender berlarut-larut, mundurnya waktu pelaksanaan proyek, dan lain-lain.

12.3 Risiko sosial

Secara garis besar, risiko lingkungan terhadap pembangunan PLTB adalah risiko sosial, misalnya risiko penolakan dari masyarakat sekitar, pencemaran lingkungan, dan lain-lain.

12.4 Risiko finansial

Meliputi risiko-risiko yang timbul berkaitan dengan keuangan, seperti izin pemegang saham, tidak mendapatkan izin untuk *full equity*, *project cost over run*, kelemahan klausal kontrak, dan lain-lain.

Semua jenis risiko di atas dituangkan dalam tabel daftar risiko pada Lampiran D.

13 Keselamatan

Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) adalah bidang yang terkait dengan keselamatan dan kesehatan manusia yang bekerja di sebuah institusi maupun lokasi proyek.

Bagian ini berisikan K3 berkaitan dengan dampak pembangunan dan pengoperasian pembangkit terhadap orang dan peralatan utama PLTS.

14 Rekomendasi kelayakan

Rekomendasi kelayakan diambil berdasarkan hasil analisis seluruh aspek yang telah dibahas sebelumnya. Laporan studi kelayakan disusun dengan sistematika sebagaimana pada Lampiran E.
Konsultan pelaksana harus mencantumkan masa berlaku laporan studi kelayakan sampai paling lama 2 tahun dari sejak diterbitkannya laporan studi kelayakan. Laporan studi kelayakan dilengkapi dengan lampiran peta, gambar, tabel, foto, dan lain-lain.

Lampiran A
(normatif)
Metode penentuan EPF

Angin merupakan udara yang bergerak dan memiliki fluktuasi yang tinggi sehingga sulit untuk memprediksi keberadaan angin di suatu daerah. Untuk memprediksi keberadaan angin di suatu tempat dilakukan dengan mengumpulkan data kecepatan angin kemudian diolah dengan menggunakan distribusi *Weibull* dan berguna untuk mendapatkan prediksi yang akurat mengenai potensi energi angin di suatu tempat dan mengetahui karakteristik dan pola kecepatan angin.

Pada metode distribusi *Weibull* terdapat dua parameter yakni parameter bentuk *k* (tanpa dimensi) dan parameter skala *c* (m/s). Nilai parameter *k* diperoleh berdasarkan data-data kecepatan angin aktual di lapangan sehingga cukup representatif untuk mengetahui distribusi dari sejumlah data kecepatan angin yang bervariasi. Untuk menentukan nilai parameter bentuk *k*, jika nilai tengah dan variannya telah diketahui dapat menggunakan persamaan (A.1):

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{u}}\right)^{-1,086} \qquad (A.1)$$

Keterangan:

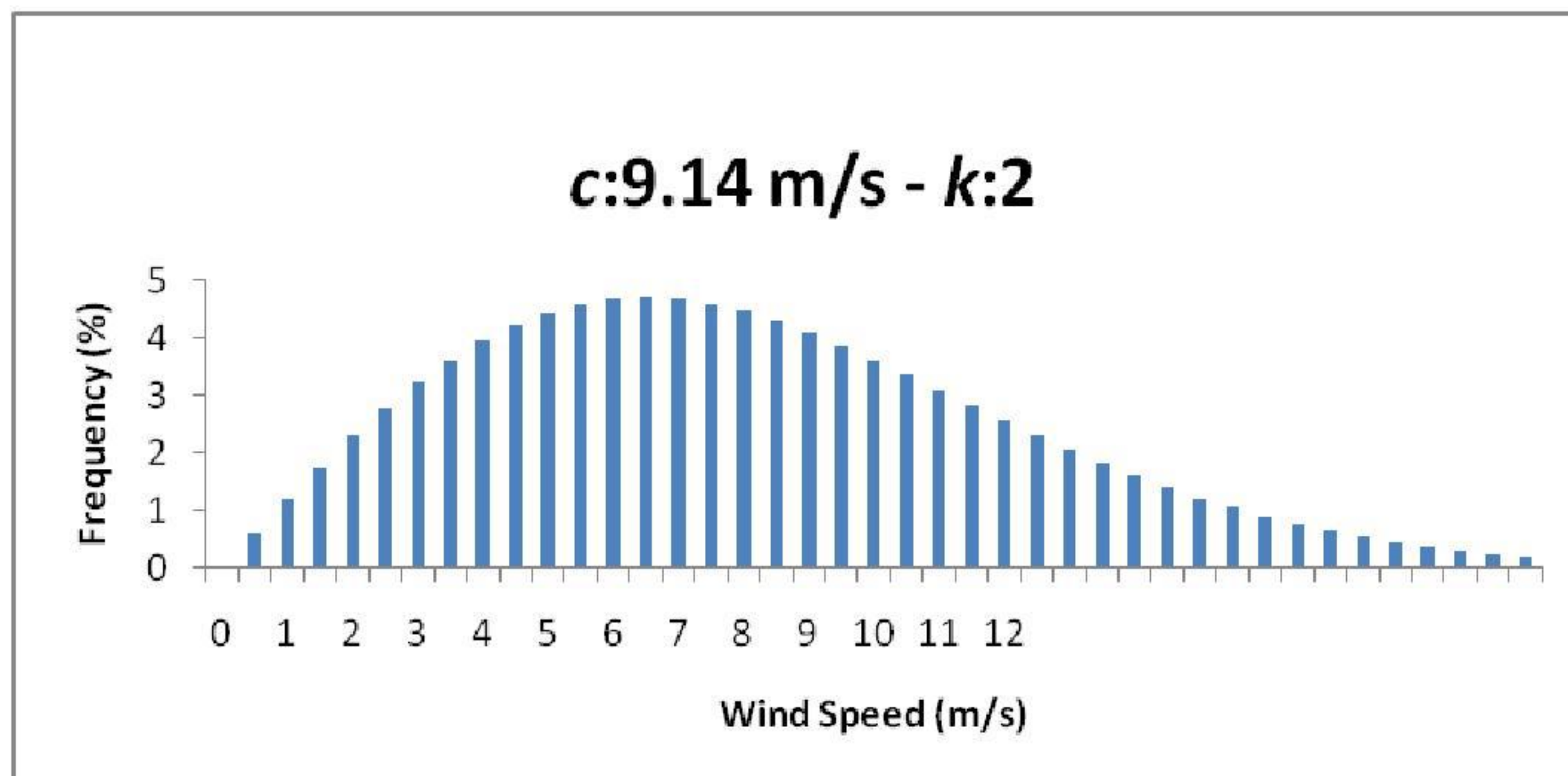
σ adalah nilai standar deviasi kecepatan angin

$\bar{u}$ adalah kecepatan angin rata-rata (m/det)

Variasi kecepatan angin sangat dipengaruhi oleh besarnya nilai *k*; Jika nilai parameter *k* makin besar maka variasi kecepatan angin makin kecil dan sebaliknya jika nilai parameter *k* makin kecil maka variasi kecepatan angin makin besar.

Untuk mendapatkan nilai *c* digunakan persamaan (A.2):

$$c = 1,12\,\bar{u} \quad \text{(m/s)} \qquad 1,5 \leq k \leq 4 \qquad (A.2)$$

Jika nilai *c* makin kecil, maka kurva akan bergeser ke arah kecepatan angin yang lebih rendah; demikian juga sebaliknya, jika nilai *c* besar maka kurva akan bergeser ke arah kecepatan angin yang lebih tinggi. Grafik distribusi fungsi *Weibull* diperlihatkan pada Gambar berikut:

Gambar A-1 Distribusi *Weibull*

- **Rapat daya angin (*Wind Power Density* - WPD)**

Dengan mengabaikan statistik distribusi *Weibull*, rapat daya spesifik (WPD) didefinisikan dengan persamaan A.3.

$$WPD = P_W = \frac{1}{2}\rho A u^3 \qquad \text{(A.3)}$$

Keterangan:

P_W	adalah daya (angin)	(W)
A	adalah luas area sapuan rotor turbin angin	(m^2)
ρ	adalah densitas udara	(kg/m^3)
u	adalah kecepatan angin	(m/det)

WPD dipengaruhi oleh adanya faktor pola enegi EPF sehingga persamaan WPD menjadi:

$$WPD = P_W = \frac{1}{2}.EPF.\rho.u^3 \qquad \text{(A.4)}$$

dengan

$$EPF = \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} V_i^3}{\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} V_i\right)^3} = \frac{1}{n\bar{V}^3}\sum_{i=1}^{n} V_i^3 \qquad \text{(A.5)}$$

Keterangan:

EPF adalah *Energy Pattern Factor*
n adalah jumlah pencatan setiap jam selama 1 tahun
Vi adalah kecepatan pada jam ke i

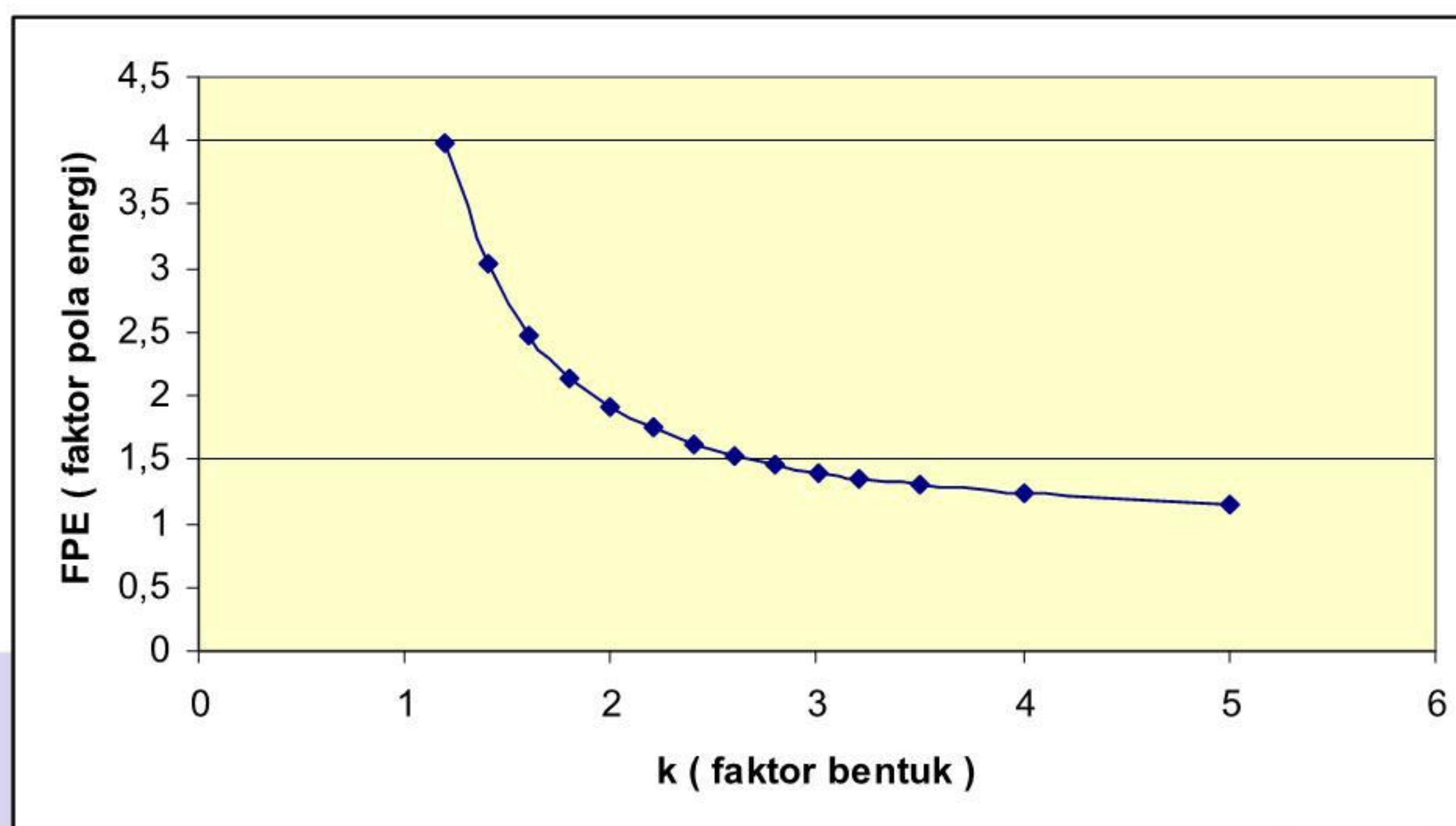
Dengan metode komputasi, nilai EPF berdasarkan persamaan di atas dapat ditentukan dan selanjutnya digunakan untuk menentukan WPD. Dari WPD kemudian dapat menaksir potensi energi angin di lokasi yang dinyatakan dalam AkWh.

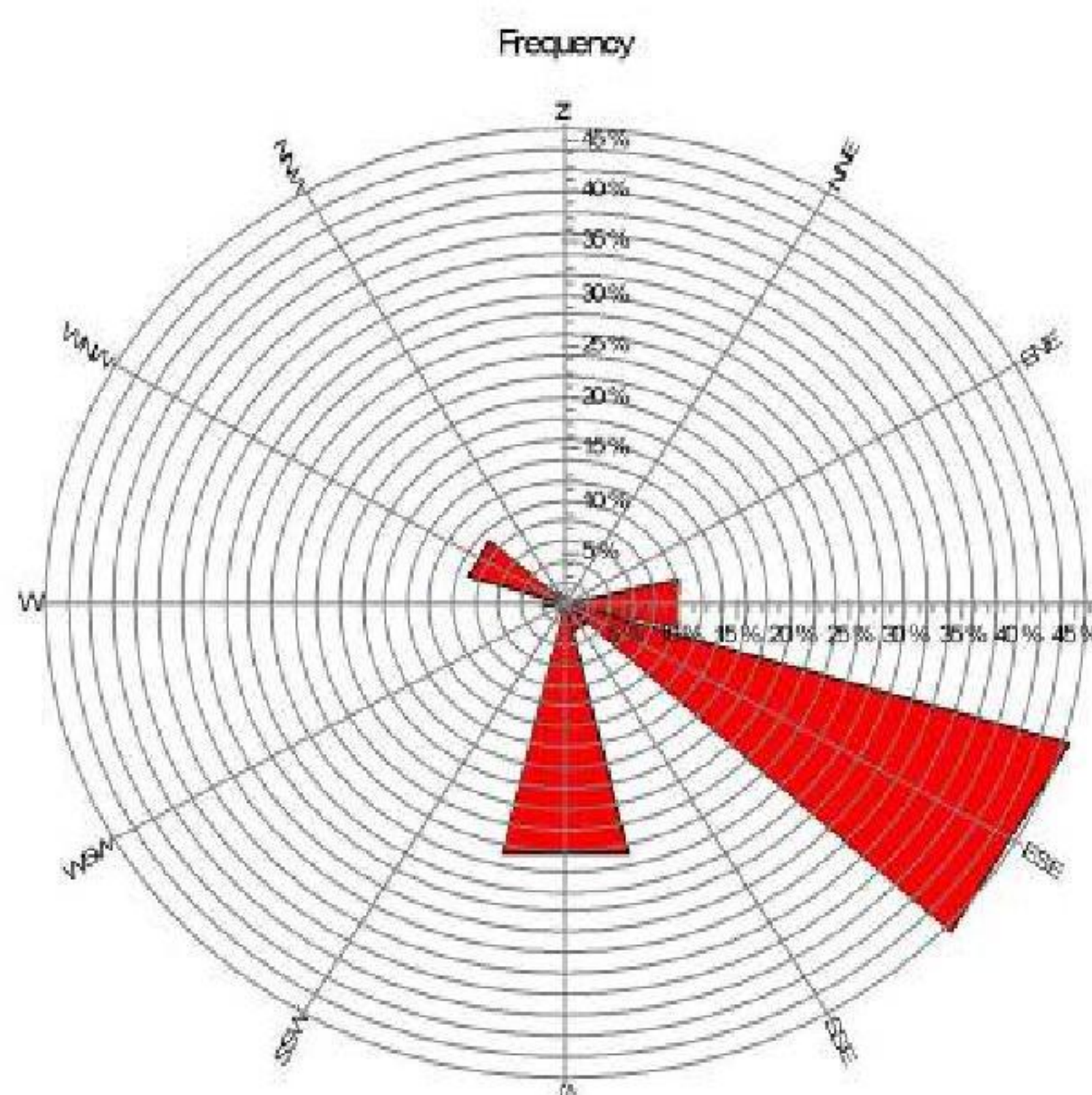
Metode penentuan EPF dengan cara ini lebih lama karena untuk memperoleh hasil yang akurat memerlukan data kecepatan angin setiap jam selama 1 bulan dan kemudian 1 tahun.

Cara lain untuk menentukan EPF adalah dengan menggunakan nilai k yaitu faktor *Weibull* yang diperoleh dari kurva distribusi kecepatan angin berdasarkan pengukuran data angin di

lokasi. Selanjutnya dari hubungan antara k dan EPF maka nilai EPF dapat diperoleh dengan menggunakan Tabel A-1 berikut atau yang lebih teliti dari kurva A-2 yang menyatakan hubungan antara EPF dan k.

Tabel A-1 - Faktor Weibull dan EPF

k	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2	3.5	4.0	5.0
EPF	3.99	3.03	2.48	2.14	1.91	1.75	1.63	1.53	1.46	1.40	1.36	1.30	1.23	1.15

Gambar A-2.- Faktor Weibull dan EPF

Distribusi arah angin dinyatakan dalam *windrose*, seperti diperlihatkan pada Gambar A-3

Gambar A-3 - *Windrose* (distribusi arah angin)

Lampiran B
(informatif)
Produk turbin angin

a. Contoh spesifikasi sebuah turbin angin skala besar *on grid*

Rotor	
Diameter	82.4 m
Swept area	5,300 m²
Synchronous rotor speed	17 / 11 rpm
Power regulation	CombiStall®
Blades	
Type	B40
Length	40 m
Aerodynamic brake	
Type	Full span pitch
Activation	Hydraulic, fail-safe
Transmission system	
Gearbox type	3-stage planetary/helical
Gearbox ratio	1:91
Gearbox oil filtering	Inline and offline
Gearbox cooling	Separate oil cooler
Oil volume	Approx. 400 l
Mechanical brake	
Type	Fail-safe disc brake

Generator	
Type	Asynchronous
Nominal power	2,300 / 400 kW
Synchronous speed	1,500 / 1,000 rpm
Voltage	690 V
Cooling system	Integrated heat exchanger
Yaw system	
Type	Active
Monitoring system	
SCADA system	WebWPS
Remote contro	Full turbine control
Tower	
Type	Cylindrical and/or tapered tubular
Hub height	60 m, 80 m or site-specific
Operational data	
Cut-in wind speed	4 m/s
Nominal power at	13-14 m/s
Cut-out wind speed	25 m/s
Maximum 2 s gust	55 m/s (standard version) 60-80 m/s (special version)
Weights	
Rotor	54 tons
Nacelle	82 tons
Tower	Site-specific

b. Contoh beberapa produk turbin angin skala besar*)

Kapasitas	Jumlah sudu	Diameter rotor, m	Tinggi menara, m	Berat, ton
600 kW	3	50	75	85
1,5 MW	3	70	70	115
2,0 MW	3	77	80	260
2,0 MW	3	66	80	168
2,0 MW	3	90	95	231
2,0 MW	3	77	80	260
2,3 MW	3	93	103	282

*) sebagai gambaran untuk menunjukkan dimensi (dalam m) dan berat turbin angin (dalam ton) yang besar sehingga memerlukan kajian yang cermat untuk pengiriman, pemasangan, serta operasi dan pemeliharaan (OM), termasuk pengadaan perlengkapan berat.

Lampiran C
(normatif)
Sumber pendanaan PLTB

Tabel C-1 – Sumber pendanaan

Uraian	Persentase (%)		Jumlah
	(a)	(b)	(c = a + b)
1. Modal sendiri			
2. Pinjaman			
Jumlah (1+2)			

Tabel C-2 - Kebutuhan pembiayaan/modal investasi

Uraian	Banyaknya (1)	Harga/Unit (2)	Jumlah (3 = 1 x 2)
a. Tanah			
b. Bangunan			
c. Mesin/Peralatan			
d. Peralatan kantor			
e. Alat angkut			
f. Infrastruktur			
g. Biaya pra operasi			
Jumlah			

Tabel C-3 – Kebutuhan pembiayaan/modal kerja

Uraian	Banyaknya (1)	Harga/Unit (2)	Jumlah (3 = 1 x 2)
a. Bahan baku			
b. Persediaan bahan			
c. Produk dalam proses			
d. Piutang			
e. Uang Kas			
Jumlah			

Tabel C-4 – Analisis biaya tetap

Uraian	Banyaknya (1)	Harga/Unit (2)	Jumlah (3 = 1 x 2)
a. Gaji			
b. Penyusutan			
c. Bunga pinjaman			
d. Biaya pemasaran			
e. Biaya lainnya			
Jumlah			

Tabel C-5 – Analisis biaya tidak tetap

Uraian	Banyaknya (1)	Harga/Unit (2)	Jumlah (3 = 1 x 2)
a. Upah			
b. Biaya bahan			
Jumlah			

Tabel C-6 – Proyeksi aliran kas usaha

Uraian	Tahun				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
a. Sumber dana (*in flow*)					
b. Penggunaan dana (*out flow*)					
c. Arus kas bersih (*net flow* = a – b)					
d. Keadaan kas awal					
e. Keadaan kas akhir (c + d)					

Rencana Modal Kerja

Kebutuhan modal kerja yang terdiri dari beberapa komponen biaya yang diberikan pada Tabel C-3.

Lampiran D
(normatif)
Risiko pembangunan PLTB

Tabel D-1 - Kajian risiko

No	Jenis risiko	Sumber risiko	Kemungkinan terjadi	Dampak	Mitigasi	Tingkat risiko
1.						
2.						
3.						
4.						
5.						
dst						

Penilaian kemungkinan terjadi dan tingkat pada tabel daftar risiko mengacu kepada tabel kriteria penetapan ukuran risiko:

Tabel D-2 - Kriteria penetapan ukuran risiko

No	Uraian	Skala	Keterangan
Kemungkinan terjadinya risiko			
1	sangat besar	5	frekuensi atau persentase kejadiannya sangat tinggi yaitu lebih dari 80%
2	besar	4	frekuensi atau persentase kejadiannya tinggi yaitu antara 60% sampai dengan 80%
3	cukup	3	frekuensi atau persentase kejadiannya cukup yaitu antara 40% sampai dengan 60%
4	kecil	2	frekuensi atau persentase kejadiannya tidak terlalu tinggi yaitu antara 20% sampai dengan 40%
5	tidak signifikan	1	frekuensi atau persentase kejadiannya tidak signifikan yaitu sampai dengan 20%
Klasifikasi risiko			
1	rendah (pesimis)		melakukan *monitoring*, pemeliharaan level risiko untuk tidak menjadi lebih besar
2	moderat		
3	tinggi (optimis)		menjadi prioritas pengendalian risiko

Lampiran E
(normatif)
Sistematika laporan studi kelayakan

KATA PENGANTAR
RINGKASAN EKSEKUTIF
1. PENDAHULUAN
    1.1. Latar belakang
    1.2. Maksud dan Tujuan
    1.3. Ruang lingkup proyek
    1.4. Pemangku kepentingan proyek
2. IDENTIFIKASI LOKASI
    2.1. Deskripsi umum
        2.1.1. Nama lokasi (Desa, Kecamatan, Kota/Kabupaten, Provinsi)
        2.1.2. Peta dan posisi geografi (lintang, bujur, dan ketinggian)
        2.1.3. Topografi (kontur, orografi, dan rintangan)
        2.1.4. Kondisi permukaan tanah dan jenis tutupan lahan
        2.1.5. Informasi bencana alam (gempa, tsunami, angin puting beliung)
    2.2. Infrastruktur
        2.2.1. Aksesibilitas ke lokasi
        2.2.2. Kondisi kelistrikan (nasional, wilayah, dan daerah)
        2.2.3. Sistem komunikasi
3. DATA DAN INFORMASI POTENSI ENERGI ANGIN
    3.1. Identifikasi data angin di lokasi
        3.1.1. Kecepatan angin
        3.1.2. Arah angin
        3.1.3. Distribusi frekuensi kecepatan dan arah angin
        3.1.4. Rapat daya angin (WPD – *Wind Power Density*)
    3.2. Potensi energi angin di lokasi
4. DATA PEMAKAIAN BEBAN DAN KELISTRIKAN
    4.1. Sistem tidak terhubung ke jaringan *(off grid)*
        4.1.1. Jumlah dan jenis beban
        4.1.2. Sebaran konsumen/beban
        4.1.3. Pola beban
        4.1.4. Proyeksi kurva beban
    4.2. Sistem terhubung ke jaringan *(on grid)*
        4.2.1. Pembangkit terpasang, termasuk energi terbarukan
        4.2.2. Sistem transmisi
        4.2.3. Sistem distribusi
        4.2.4. Studi interkoneksi ke jaringan
            4.2.4.1. Perjanjian penyambungan
            4.2.4.2. Pengaturan sistem
            4.2.4.3. Karakteristik *sub-station*
            4.2.4.4. Hasil studi dampak sistem
    4.3. Sistem pembumian dan proteksi
        4.3.1. Sistem pembumian
        4.3.2. Sistem proteksi
    4.4. Sistem *metering* dan *monitoring*
5. PEMILIHAN DAN PENENTUAN TEKNOLOGI TURBIN ANGIN
    5.1. Parameter dan data teknis turbin angin
    5.2. Kurva daya dan densitas udara
    5.3. Output energi dari turbin angin
    5.4. Pemilihan turbin angin
    5.5. Sistem kontrol dan *monitoring*
6. INSTALASI PLTB

6.1. Konfigurasi sistem PLTB
6.2. Tata letak pembangkit dan sarana lainnya
6.3. Gambar detail teknis PLTB
6.4. Gambar detail sistem kelistrikan
6.5. Bangunan sipil
6.6. Bangunan pendukung

7. PENILAIAN DAMPAK LINGKUNGAN
(Mengacu pada peraturan terkait AMDAL/UKL-UPL)

8. ASPEK LEGAL
8.1. Penggunaan lahan, peta kepemilikan, dll
8.2. Wilayah konservasi/taman nasional
8.3. Rencana tata ruang dan wilayah
8.4. Badan hukum pengelola (Koperasi, Perusda KSO, dll)
8.5. AD/ART organisasi pengelola
8.6. Sertifikat Laik Operasi (SLO)

9. ASPEK SOSIAL
9.1. Kependudukan
9.2. Keberterimaan masyarakat
9.3. Partisipasi lokal

10. RENCANA ANGGARAN BIAYA
10.1. Biaya bangunan sipil (rumah kontrol, pagar, dll)
10.2. Biaya pengadaan komponen PLTB
10.3. Biaya pengadaan komponen pendukung
10.4. Biaya angkutan dan pemasangan
10.5. Biaya instalasi transimisi, jaringan, dan distribusi
10.6. Biaya pengawasan dan sertifikasi
10.7. Biaya pelatihan operasi, pemeliharaan, dan pengelolaan

11. ANALISIS BIAYA PEMBANGUNAN PLTB
11.1. Biaya produksi energi
11.2. Biaya tetap tahunan
11.3. Biaya operasional dan perawatan tahunan
11.4. Biaya investasi proyek
11.5. Analisis ekonomi dan finansial PLTB
11.5.1. Keekonomian PLTB (COE dan PP)
11.5.2. *Net Present Value* (NPV)
11.5.3. *Internal Rate of Return* (IRR)
11.6. *Payback Period* (ROI)

12. ANALISIS RISIKO

13. PENUTUP
13.1. Kesimpulan
13.2. Rekomendasi

DAFTAR PUSTAKA
LAMPIRAN

Informasi pendukung terkait perumus standar

1. Komtek perumus SNI

Komite Teknis 27-03, Aneka Energi Baru dan Energi Terbarukan

2. Susunan keanggotaan Komite Teknis perumus SNI

Ketua	: Ahmad Indra Siswantara
Wakil ketua	: Mochamad Sjachdirin
Sekretaris	: Faisal Rahadian
Anggota	: Adjat Sudrajat
	Soeripno Martosaputro
	Nanda Avianto Wicaksono
	Pahlawan Sagala
	Sentanu Hindrakusuma
	Harry Indrawan
	Carolus Boromeus Rudationo
	Eddy Permadi
	Ika Hartika Ismet
	Oo Abdul Rosyid
	Sahat Pakpahan
	Asep Sopandi
	Tony Susandy
	Yudistira Christika Elia
	Indra Djodikusumo
	Ezrom M.D. Tapparan

3. Konseptor rancangan SNI

Drs. Soeripno Martosaputro, MT

4. Sekretariat pengelola Komite Teknis perumus SNI

Direktorat Aneka Energi Baru dan Energi Terbarukan

Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi
Kementerian ESDM